

Analisi spettrale di dati MIVIS: un caso di studio sull'isola di Vulcano

Maria Paola Bogliolo⁽¹⁾, Sergio Teggi⁽²⁾, Maria Fabrizia Buongiorno⁽³⁾,
Stefano Corradini⁽²⁾, Valerio Lombardo⁽³⁾, Luca Merucci⁽³⁾ e Sergio Pugnaghi⁽²⁾

Si descrive un caso di studio mirato alla valutazione delle potenzialità del MIVIS in applicazioni di caratterizzazione della superficie. Il data-set è costituito dai canali del Visibile e Infrarosso riflesso di un'immagine del cono vulcanico della Fossa (isola di Vulcano), trasformata in riflettanze superficiali. Lo studio comprende: una valutazione della qualità dei dati, l'applicazione di tecniche di classificazione spettrale, il confronto degli spettri MIVIS di alcune unità classificate con spettri misurati in laboratorio. I risultati mostrano come sia stato possibile individuare diversi tipi di depositi e alterazioni ed estrarre informazioni chimico-mineralogiche basandosi sull'identificazione delle bande di assorbimento, seppure con alcune limitazioni.

Introduzione

L'identificazione di un particolare costituente della superficie nei dati acquisiti mediante telerilevamento dipende dalla possibilità di ricostruire la sua firma spettrale [Hunt, 1980]; ciò è condizionato da vari fattori, quali il tipo di sostanza da individuare e la sua abbondanza relativa, le caratteristiche dello strumento, le condizioni di acquisizione e il tipo di elaborazione a cui l'immagine viene sottoposta [Vane e Goetz, 1988].

La peculiarità dei dati telerilevati iperspettrali consiste nell'elevato contenuto di informazione spettrale; per sfruttare al meglio questo aspetto, è necessaria una valutazione accurata della riflettanza della superficie e la scelta di un approccio deterministico all'interpretazione, basato sull'analisi spettrale pixel per pixel.

E' inoltre importante valutare la perdita di informazione spettrale causata dal rumore (strumentale e ambientale); infatti, l'interpretazione degli spettri estratti è impossibile se il livello di rumore è elevato rispetto alle dimensioni (profondità e larghezza) delle bande di assorbimento diagnostiche [Smith e Curran, 1996].

⁽¹⁾Istituto Superiore per la Prevenzione E la Sicurezza del Lavoro, Via Fontana Candida, 1
00040 Monteporzio Catone (Roma)

⁽²⁾Osservatorio Geofisico - Università di Modena e Reggio Emilia, Via Campi, 213/A - 41100 Modena

⁽³⁾Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Via di Vigna Murata, 605 - 00143 Roma

Ricevuto il 08/06/00 - Accettato il 06/09/00

A case study aimed to evaluate MIVIS capability in applications of surface characterisation is described. The data set includes the Visible and reflected Infrared channels of an image acquired on the "La Fossa" volcanic cone (Vulcano island), transformed in surface reflectance. The main steps are: data quality evaluation, application of spectral classification techniques, comparison of MIVIS spectra of the classified units with laboratory spectra. The results show that it was possible to detect different deposits and alterations and to extract chemical-mineralogical information based on identification of the absorption bands, even if with some limitations.

In questo lavoro, un approccio del tipo sopra descritto è stato usato sui dati acquisiti dal sensore MIVIS [Bianchi et al., 1994] per studiarne le potenzialità in applicazioni di caratterizzazione della superficie. Lo studio si è sviluppato nelle seguenti fasi: 1) una analisi della qualità dei dati MIVIS in termini di rapporto segnale/rumore (SNR); 2) l'applicazione di tecniche di classificazione spettrale sui dati trasformati in riflettanze superficiali assolute [Bogliolo et al., 1998]; 3) l'analisi degli spettri delle unità classificate, per testare l'individuabilità delle bande di assorbimento e dedurre informazioni sulla composizione dei materiali.

Caso studiato e dati utilizzati

L'immagine in esame è stata ripresa dal MIVIS sull'isola di Vulcano [Bianchi et al., 1996] il 21 luglio 1994 alle ore 8:15 solari da una quota di 2000 m s.l.m., con una risoluzione al suolo tra i 4 e i 3.2 m. Dall'immagine è stata ritagliata una finestra di 480 x 710 pixel in corrispondenza del cono vulcanico della Fossa; i canali utilizzati sono quelli dei primi 3 spettrometri (canali 1 + 92; 0.441+2.473 μ m). L'immagine grezza (in DN) è stata impiegata per le valutazioni relative al rumore, mentre per l'interpretazione è stata usata l'immagine in riflettanza superficiale assoluta ottenuta mediante l'inversione di un modello di trasferimento radiativo applicato sull'immagine calibrata [Bogliolo et al., 1998].

In questo studio si è fatto uso anche di dati ausiliari messi a disposizione dal Progetto L.A.R.A., fra i quali i risultati delle prove al banco ottico effettuate immediatamente

prima e dopo la campagna di misure e i fattori di calibrazione dell'immagine. Sono state inoltre impiegate misure di riflettanza spettrale effettuate in laboratorio con uno spettroradiometro FieldSpec [ASD Inc.], operante tra 0.35 e 2.5 μm , su campioni raccolti nell'area in studio, e la libreria spettrale di minerali dell'U.S.G.S.

La Fossa è un cono vulcanico alto 390 m, costituito prevalentemente da prodotti piroclastici [De Astis et al., 1997]; l'ultimo episodio eruttivo risale al 1888-1890, mentre attualmente è presente un'intensa attività fumarolica sul bordo e sui fianchi interni del cratere [Frazzetta et al., 1983]. In alcuni affioramenti sono presenti associazioni mineralogiche diverse dai silicati, originate per interazione con l'acqua durante le eruzioni, per alterazione idrotermale o per precipitazione da fasi gassose [Capaccioni e Coniglio, 1995]. Tali mineralizzazioni presentano in genere firme spettrali caratteristiche nell'intervallo 0.4 – 2.5 μm [Hunt e Ashley, 1979], a differenza delle rocce ignee inalterate; le nostre analisi spettrali sono state quindi mirate a distinguere e caratterizzare questi tipi di deposito.

Valutazioni della qualità dei dati

Le prestazioni del sensore durante l'acquisizione sono state valutate effettuando, sul data-set a disposizione, stime di rumore che sono poi state confrontate con le misure al banco ottico ottenute per la velocità di scansione (25 Hz) usata durante la ripresa dell'immagine. Sono stati applicati e messi a confronto tre metodi riportati in letteratura. Il primo considera la deviazione standard delle dark current misurate linea per linea durante l'acquisizione [Carrere e Abrams, 1988]. Il secondo impiega la deviazione standard di un'area omogenea sull'immagine [Gao, 1993]; nel nostro caso è stata selezionata un'area di 60 pixel in corrispondenza del mare, in modo da minimizzare la variabilità inter-pixel che può condurre a sovrastime [Curran e Dungan, 1989]. Il terzo metodo è quello proposto da Gao [1993]: l'immagine viene divisa in piccole celle, per ciascuna delle quali viene calcolata la deviazione standard; il valore più frequente viene considerato una stima del rumore, in base all'assunzione che l'immagine contenga un gran numero di aree omogenee di piccola estensione [Gao, 1993; Roger e Arnold, 1996]. L'applicazione di questo metodo sull'immagine MIVIS ha rivelato che la dimensione delle celle è un parametro critico per l'ottenimento di stime attendibili e deve essere scelta in funzione della risoluzione dell'immagine: nel caso studiato, celle di 3x3 pixel sono risultate più appropriate di quelle 4x4 utilizzate da Gao su immagini AVIRIS.

I valori di rumore sono stati calcolati sui dati grezzi (DN) e sono stati poi convertiti in Noise Equivalent Radiances (NER) usando i fattori di calibrazione dell'immagine. In Figura 1 sono riportati i risultati ottenuti: i metodi dell'area omogenea e di Gao hanno fornito valori molto simili,

che approssimano bene le misure al banco ottico nel secondo e terzo spettrometro; l'unica discrepanza rilevante si ha per i canali 5-20 (0.520 - 0.822 μm); ciò può indicare che la variabilità naturale della scena non è stata completamente eliminata, ma non si possono escludere differenze strumentali, in quanto, proprio per questi canali, sono state usate amplificazioni diverse durante le riprese e al banco ottico. Il metodo delle dark current sembra invece sottostimare il rumore in tutto l'intervallo campionato.

Gli effetti della calibrazione sul livello di rumore dell'immagine sono stati valutati ripetendo le stime sui dati in radianza: in questo caso il metodo dell'area omogenea ha fornito più indicazioni: la NER varia molto poco, eccetto che in alcuni canali del primo spettrometro dove compare un rumore sistematico (non rilevabile con il metodo di Gao, 1993), riscontrabile anche visivamente sull'immagine (line striping). I canali affetti da questo fenomeno corrispondono a quelli in cui è stata rilevata una maggiore deviazione standard delle dark current (Fig. 1).

La qualità dei dati è stata quantificata in termini di rapporto Segnale/Rumore (SNR), calcolato dividendo la radianza media di un'area di circa 100 pixel per la NER ottenuta al banco ottico. Sono stati considerati una superficie a bassa riflettanza (piroclastiti; riflettanze da 4% a 10%) ed una ad alta riflettanza (depositi alterati; riflettanze da 50% a 30%). Questi casi estremi definiscono il campo di SNR incontrato durante la successiva fase di interpretazione. Altri tipi di superficie non geologici sono stati esclusi perché non oggetto di studio in questo lavoro. I risultati sono mostrati in Figura 2. Sebbene i canali del primo spettrometro abbiano un livello di rumore più elevato (Fig. 1), il SNR è alto [Smith e Curran, 1996] anche per la superficie scura, grazie agli elevati valori di irradianza solare a queste lunghezze d'onda. I canali 25 e 26 del secondo spettrometro hanno un SNR particolarmente basso, perché coincidono con il forte assorbimento atmosferico intorno a 1.4 μm . Nel terzo spettrometro il SNR è ovunque basso; ciò è dovuto ad una combinazione di fattori quali l'elevato rumore strumentale, la bassa riflettanza delle superfici in esame, la bassa irradianza solare (peggiolata dall'ora di ripresa) e l'assorbimento atmosferico. In particolare, il SNR diminuisce drasticamente per lunghezze d'onda maggiori di 2.35 μm , dove il rumore aumenta rapidamente (Fig. 1) e la trasmittanza atmosferica è molto bassa. Per i tre canali 59, 63 e 70 i valori bassissimi di SNR sono invece dovuti al loro mancato funzionamento (Fig. 1).

Le curve di SNR hanno costituito la base per stabilire i criteri di applicazione di tecniche di riduzione del rumore e di selezione dei canali da utilizzare nell'analisi spettrale. Tutti i canali del terzo spettrometro sono stati sottoposti a filtraggio spettrale applicando la tecnica della Minimum Noise Fraction [Green et al., 1988], a partire dalle stime di rumore ottenute con la tecnica di Gao

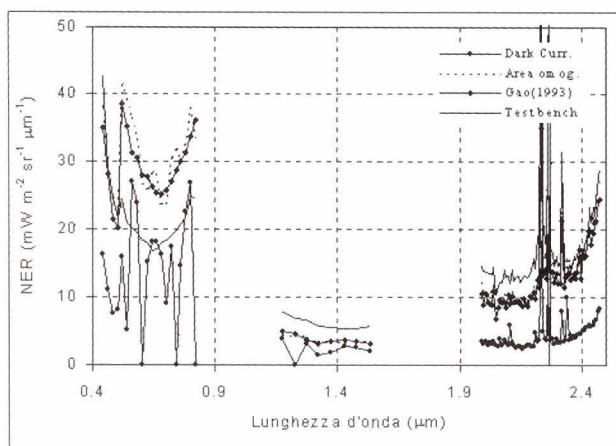


Figura 1 - Noise Equivalent Radiance per l'immagine MIVIS in esame, calcolate con diversi metodi (vedi testo). Le misure al banco ottico sono state eseguite dopo la campagna di riprese con una frequenza di scansione (25 Hz) pari a quella usata durante l'acquisizione dell'immagine. I valori ottenuti con il metodo di Gao [1993] e dell'area omogenea sono calcolati sui dati grezzi (DN).

[1993]. Sono stati inoltre eliminati i canali aventi un SNR vicino a 0 (tutti i canali al di là di 2.35 μm (75-92) e i già citati canali del secondo e terzo spettrometro).

Analisi spettrale

I risultati migliori nella mappatura dei depositi legati a processi di alterazione sono stati ottenuti applicando separatamente due tecniche di classificazione spettrale, lo Spectral Angle Mapping (SAM) [Kruse et al., 1993] e il Linear Spectral Unmixing (LSU) [Boardman, 1989], all'immagine in riflettanza, e combinandone successivamente i risultati per costruire la carta tematica. Gli spettri puri (end-members) che queste tecniche richiedono sono stati selezionati sull'immagine in base alle indicazioni ottenute durante i rilievi sul campo e dall'esame degli spettri di riflettanza. La tecnica LSU ha consentito di separare le principali unità superficiali: vegetazione verde, vegetazione secca, lave e piroclastiti non alterate, depositi con zolfo, tufi cineritici rossastri, depositi di alterazione idrotermale; il mare e le ombre residue (ombre gettate) sono state mascherate prima dell'elaborazione. Il metodo SAM è stato usato per mettere in evidenza il diverso grado di alterazione all'interno delle unità alterate già classificate.

La mappatura delle principali unità alterate (Fig. 3) è stata ottenuta tramite una composizione RGB dei risultati dello Spectral Unmixing relativi agli end-members alterazioni idrotermali (rosso), tufi cineritici (verde) e depositi con zolfo (blu); gli altri colori (es. giallo) indicano la presenza contemporanea, in diverse percentuali, di queste unità. L'immagine del quinto canale (0.520 μm) è stata usata

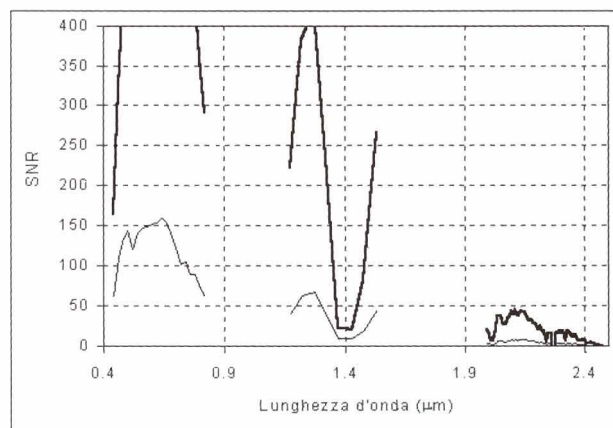


Figura 2 - Stime del rapporto segnale/rumore per due superfici geologiche con valori di riflettanza estremi per l'area in esame: $0.3 \leq \rho \leq 0.5$ (linea spessa), e $0.04 \leq \rho \leq 0.1$ (linea sottile). Nel grafico sono stati tagliati i valori alti per mettere in maggiore evidenza i valori critici del terzo spettrometro.

come sfondo dove le quantità di questi materiali scendono al di sotto di una certa soglia; la vegetazione è stata mascherata utilizzando i risultati dello Spectral Unmixing relativi agli end-members della vegetazione (verde e secca). A questa immagine sono state sovrapposte due classi ottenute con la tecnica SAM: il viola corrisponde a tufi cineritici con minori quantità di ossidi di ferro e argille, caratterizzati da uno spettro più piatto; il celeste corrisponde ad una sub-facies delle alterazioni idrotermali in cui gli assorbimenti dovuti agli ioni ferrici sono più accentuati.

In corrispondenza delle unità classificate, sono stati estratti degli spettri rappresentativi mediando i valori di piccole aree campione; questi spettri sono stati messi a confronto con quelli misurati in laboratorio su campioni provenienti dagli stessi punti (Fig. 4) e analizzati per estrarne informazioni chimico-mineralogiche, anche facendo uso di spettri di minerali provenienti da librerie spettrali (U.S.G.S.).

Gli spettri ottenuti dalle immagini MIVIS presentano alcune anomalie che riducono l'accordo con gli spettri di laboratorio. Il principale elemento anomalo è l'abbassamento delle riflettanze nei canali del terzo spettrometro, che dà luogo negli spettri a un largo affossamento tra 2.1 e 2.3 μm , la cui intensità appare proporzionale alla quantità di radiazione riflessa. Questo elemento non è spiegabile con un assorbimento superficiale, in quanto modifica lo spettro di materiali, quali la vegetazione, la cui firma spettrale è ben nota. Inoltre non è imputabile alle correzioni atmosferiche in quanto si è verificato che essa è già presente negli spettri di riflettanza apparente, inoltre non vi è correlazione fra la curva di trasmittanza atmosferica

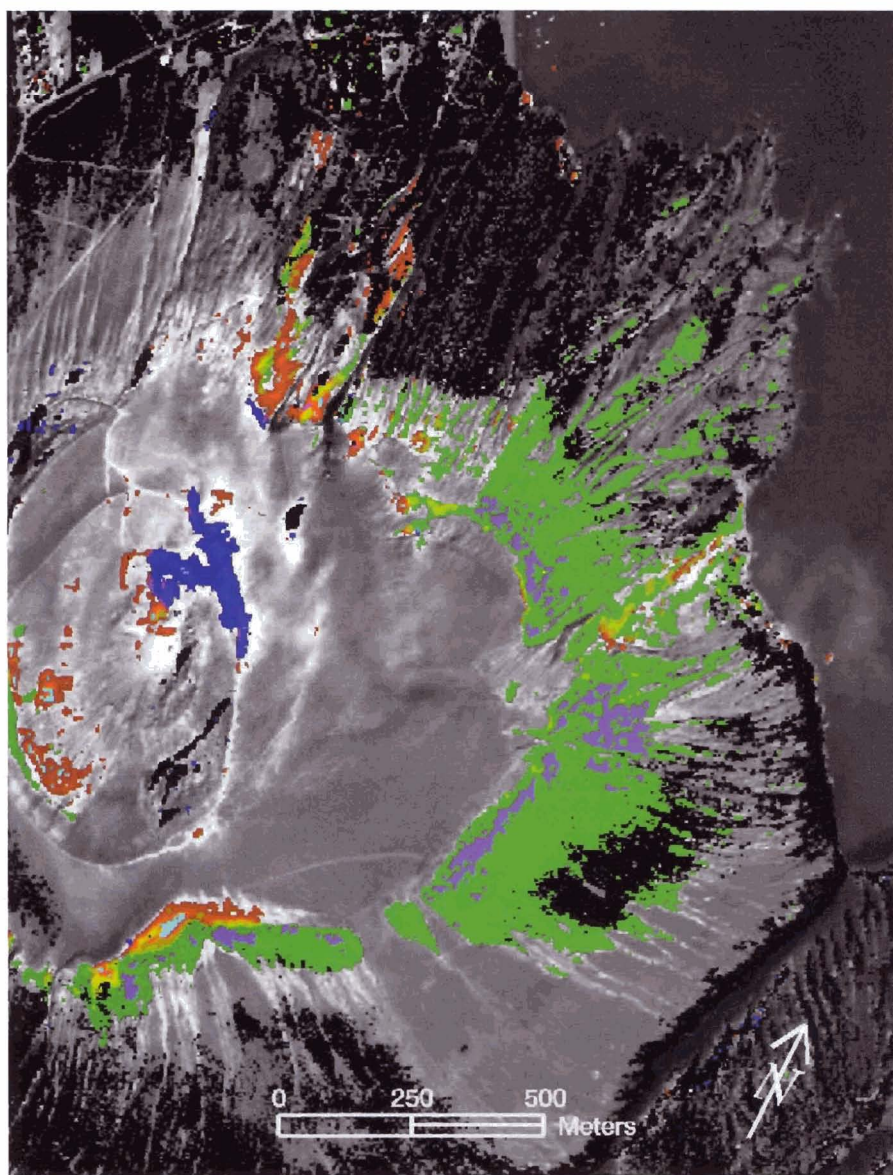


Figure 3 – La Fossa (isola di Vulcano): risultato della classificazione spettrale per la mappatura dei depositi legati a processi di alterazione (legenda: vedi testo).
(Concessione SMA 591 del 22.12.95)

e i valori di riflettanza corretta ($r = -0.16$), e infine è riscontrabile anche nei canali 41 + 68 in cui l'effetto atmosferico è debole (trasmissione atmosferica > 0.8). Un altro elemento rilevante è l'elevato livello di rumore dei canali del terzo spettrometro, e l'inattendibilità dei valori ottenuti per alcuni canali del secondo spettrometro, dovuta in entrambi i casi ai bassi valori di SNR. Nonostante i problemi sopra menzionati, l'accordo tra gli spettri MIVIS e quelli di laboratorio è generalmente buono, anche se dipende dal tipo di superficie considerata. Esso è infatti molto buono su formazioni omogenee (come è il caso dei tufi cineritici rossastri) mentre vi sono differenze significative sulle unità in cui la presenza di differenti mineralizzazioni distribuite su una piccola area

fa sì che gli spettri di laboratorio non siano ben rappresentativi dello spettro telerilevato.

Lo spettro di laboratorio dei tufi cineritici rossastri (Fig. 4a) presenta, in forma debole, gli assorbimenti tipici degli ossidi e idrossidi di ferro (caduta della riflettanza al di sotto di $0.55 \mu\text{m}$, debole spalla a $0.65 \mu\text{m}$, l'ampia banda centrata a circa $0.92 \mu\text{m}$) e dei minerali argillosi (assorbimento a $2.22 \mu\text{m}$) [Hunt et al., 1971a; Hunt et al., 1973], nel complesso indicativi di un debole grado di alterazione. Capaccioni e Coniglio [1995] descrivono questa facies come un deposito di wet-surge, caratterizzato dalla presenza di ioni Fe^{3+} , acqua e minerali argillosi originati da fenomeni di alterazione sin-deposizionale. Il corrispondente spettro MIVIS è molto simile, ma l'assorbi-

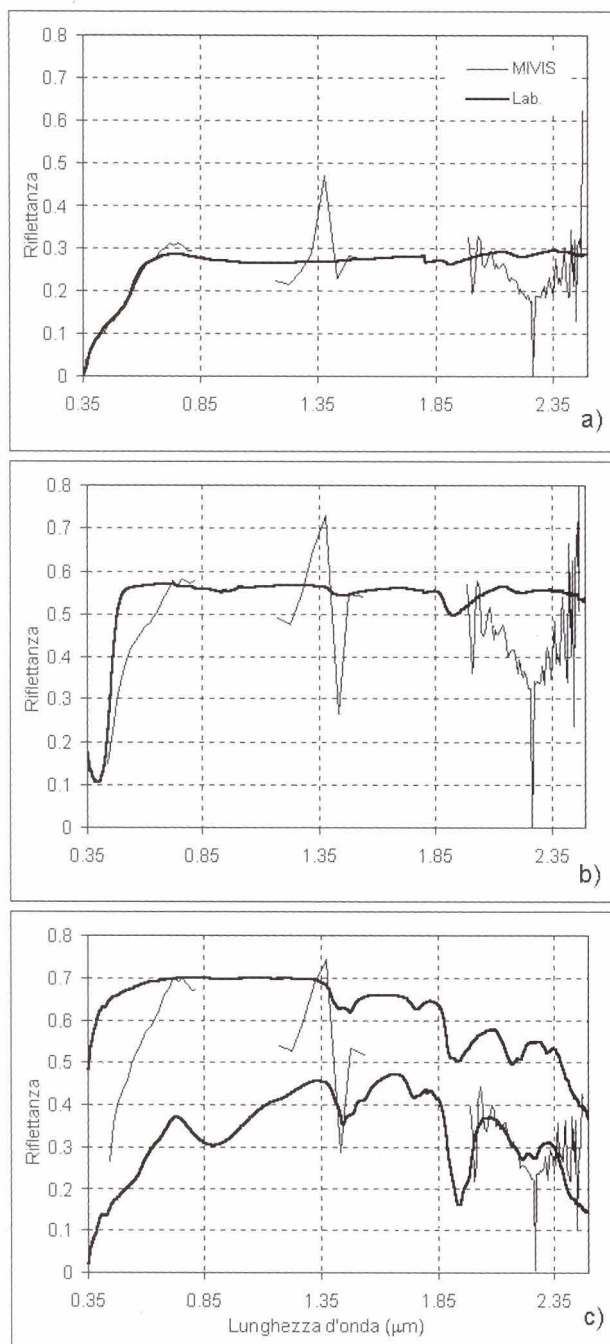


Figura 4 - Confronto tra spettri di riflettanza estratti dai dati MIVIS (linea sottile) e misure di laboratorio su campioni (linea spessa). (a) Tufi cineritici. (b) Depositi con zolfo. (c) Depositi di alterazione idrotermale.

mento presente nell'Infrarosso è imputabile, almeno in parte, all'anomalia già citata.

I depositi di zolfo marcano la presenza di aree fumaroli-

che attive; lo spettro misurato in laboratorio (Fig. 4b) presenta il netto calo di riflettanza sotto i 0.5 μm caratteristico dello zolfo [Hunt et al., 1971b]. Lo spettro MIVIS è molto meno netto e mostra assorbimenti legati alla presenza di ioni ferrici che non sono presenti nello spettro di laboratorio, misurato su un campione di zolfo cristallino. I depositi alterati presenti sul fianco Sud del cono della Fossa sono il risultato dell'attività fumarolica sui tufi cineritici rossastri e mostrano spettri molto caratteristici (Fig. 4c). In particolare, gli spettri misurati in laboratorio su diverse sub-facies di questa unità sono chiaramente dominati dalla presenza di alunite (bande di assorbimento a 1.43 e 1.47 μm , 1.76 μm , 2.17 e 2.21 μm , e 2.32 μm) e jarosite (il piccolo e netto assorbimento a 0.43 μm , la spalla a circa 0.65 μm , assorbimenti a 0.90 μm , 1.47 e 1.53 μm , 2.215 e 2.26 μm). Questi minerali sono solfati idrati, rispettivamente di alluminio e di ferro, e sono fra i prodotti tipici della cosiddetta facies di alterazione "advanced argillitic" [Hunt e Ashley, 1979]. Lo spettro MIVIS è interpretabile come una composizione di queste due specie, ma molte delle bande descritte non sono individuabili perché fuori dall'intervallo di operatività dello strumento (0.43 μm , 0.90 μm , 1.76 μm), o perché vicine alle principali bande di assorbimento del vapore acqueo (1.43, 1.47, 1.53 μm), oppure perché mascherate dal rumore (2.32 μm); inoltre, il forte decremento delle riflettanze tra 2.1 e 2.3 μm riscontrato sull'immagine in esame maschera gli assorbimenti in questa regione.

Conclusioni

In questo lavoro abbiamo analizzato un'immagine MIVIS nelle bande del Visibile e Infrarosso riflesso per studiare le potenzialità dello strumento in applicazioni di caratterizzazione della superficie.

Data l'importanza della qualità dei dati per il riconoscimento spettrale degli elementi di superficie, buona parte del lavoro è stata mirata a studiare questo aspetto. Diversi metodi di stima del livello di rumore sono stati messi a confronto, per trovare un metodo adatto ad ottenere valutazioni per ogni singola immagine, indipendentemente dalle prove di laboratorio: il metodo di Gao [1993] e il metodo dell'area omogenea appaiono affidabili, essendo in buon accordo con le misure al banco ottico. Le discrepanze ottenute nei primi canali non invalidano l'utilizzo pratico di questi metodi poiché questo intervallo è raramente caratterizzato da valori critici di SNR.

I valori di rapporto segnale/rumore ottenuti sono legati alle condizioni particolarmente sfavorevoli del caso studiato, quali la bassa riflettanza delle rocce vulcaniche e la bassa elevazione solare durante l'acquisizione; ciononostante, alcuni risultati possono essere considerati di validità generale. Tutti i canali del primo e secondo spettrometro, con esclusione del 25 e 26, possono essere considerati utili per l'analisi spettrale; più attenzione deve essere posta ai canali del terzo spettrometro. Il basso rapporto

segnale/rumore trovato in questi canali è dovuto all'azione combinata di vari fattori: bassa irradianza solare, bassa riflettanza delle superfici geologiche a queste lunghezze d'onda, scarsa ampiezza di banda, assorbimento atmosferico. Per rendere questo intervallo utile per l'analisi spettrale è necessario applicare ai dati acquisiti in questi canali delle tecniche di riduzione del rumore. I canali che acquisiscono a lunghezze d'onda maggiori di 2.35 μm (75-92) hanno valori di SNR talmente bassi che il loro impiego deve essere valutato caso per caso.

La mappatura delle facies alterate sul cono vulcanico della Fossa è stata ottenuta con tecniche di classificazione spettrale, impiegando end-members estratti dall'immagine; la tecnica del Linear Spectral Unmixing è risultata utile per separare classi con spettri molto diversi tra loro; lo Spectral Angle Mapping ha consentito di evidenziare variazioni più sottili, ed è stato usato per raffinare la classificazione. Il risultato dimostra le potenzialità del MIVIS per la mappatura della superficie; il dettaglio ottenuto nella carta prodotta rappresenta un incremento di informazione sia rispetto alle carte geologiche disponibili [Keller, 1970], sulle quali i depositi fumarolici e le alterazioni superficiali non sono riportati, sia rispetto ai risultati ottenuti in passato con altri sensori aerotrasportati a minor risoluzione [Bianchi et al., 1995].

Dall'analisi condotta sugli spettri si può concludere che è possibile, con il MIVIS, estrarre informazioni chimico-mineralogiche. E' stato possibile individuare molte bande di assorbimento significative, soprattutto nell'intervallo acquisito dal primo spettrometro, anche se alcuni elementi spettrali importanti per l'identificazione di minerali di alterazione sono stati individuati solo sugli spettri misurati in laboratorio, perché posizionati fuori dall'intervallo di operatività del MIVIS o perché mascherati dal rumore.

Bibliografia

- Bianchi R., Marino C. M. e Pignatti S.** (1994) - *Airborne hyperspectral remote sensing in Italy*. Proc. of the European Symp. on Satellite Remote Sensing. EUROPTO Series, 2318:29-37.
- Bianchi R., Pignatti S. e Cavalli R. M.** (1995) - *Analisi di dati multispettrali (TMS) dell'isola di Vulcano (Isole Eolie)*. Rivista Italiana di Telerilevamento, 5:23-34
- Bianchi R., Cavalli R. M., Fiumi L., Marino C. M. e Pignatti S.** (1996) - *Airborne remote sensing: results of two years of imaging spectrometry for the study of environmental problems*. Remote Sensing'96. Spiteri (Ed.) Balkema, Rotterdam, 269-273.
- Bogliolo M.P., Teggi S., Buongiorno M.F. e Pugnaghi S.** (1998) - *Retrieving ground reflectance from MIVIS data: a case study on Vulcano island (Italy)*. 1st EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy, EARSeL, Paris, 403-416.
- Boardman J. W.** (1989) - *Inversion of imaging spectrometry data using singular value decomposition*. Proc. IGARSS'89, 12th Canadian Symp. on Remote Sensing, 4:2069-2072.
- Capaccioni B. e Coniglio S.** (1995) - *Varicoloured and vesiculated tuffs from La Fossa volcano, Vulcano island (Aeolian Archipelago, Italy): evidence of syndepositional alteration processes*. Bull. Volcanology 57:61-70.
- Carrere V. e Abrams M.** (1988) - *An assessment of AVIRIS data for hydrothermal alteration mapping in the Goldfield district, Nevada*. Proc. AVIRIS Performance evaluation Workshop. G. Vane Ed., NASA/JPL Pub. 88-38, pp. 134-154.
- Curran P. J. e Dungan J.** (1989) - *Estimation of signal-to-noise: a new procedure applied to AVIRIS data*. IEEE Trans. on Geosci. Remote Sens., 27:620-628.
- De Astis G., La Volpe L., Peccerillo A. e Civetta L.** (1997) - *Volcanological and petrological evolution of Vulcano island (Aeolian arc, southern Tyrrhenian Sea)*. J. Geophysical Research, 102:8021-8050.
- Frazzetta G., La Volpe L. e Sheridan M. F.** (1983) - *Evolution of the Fossa cone*. J. Volcanology Geothermal Research, 17: 329-360.
- Gao B.** (1993) - *An operational method for estimating signal to noise ratios from data acquired with imaging spectrometers*. Remote Sens. Environ., 43: 23-33.
- Green A. A., Berman M., Switzer P. e Craig M. D.** (1988) - *A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal*. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 26: 65-74.
- Hunt G. R.** (1980) - *Electromagnetic radiation: the communication link in remote sensing*. In: Remote Sensing in Geology (B. Siegal and A. Gillespie, Eds.) Wiley, New York, Chap. 2.
- Hunt G. R., Salisbury J. W. e Lenhoff C.** (1971) - *Visible and Near-infrared spectra of minerals and rocks: III. Oxides and hydroxides*. Modern Geology, 2: 195-205.
- Hunt G. R., Salisbury J. W. e Lenhoff C.** (1971) - *Visible and Near-infrared spectra of minerals and rocks: IV. Sulphides and sulphates*. Modern Geology, 3:1-14.

Hunt G. R., Salisbury J. W. e Lenhoff C. (1973) - *Visible and Near-infrared spectra of minerals and rocks: VI. Additional silicates*. Modern Geology, 4:85-106.

Hunt G. R. e Ashley R. P. (1979) - *Spectra of altered rocks in the Visible and Near infrared*. Economic Geology 14: 1613-1629.

Keller J. (1970) - *Carta geologica dell'isola di Vulcano*. Scala 1:10000. Lit. Artist. Cart. Firenze.

Kruse F. A., Lefkoff A. B., Boardman J. B., Heidebrecht K. B., Shapiro A. T., Barloon P. J. e Goetz A. F. H. (1993) - *The Spectral Image Processing System*

(SIPS) – Interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. Remote Sens. Environ., 44: 145-163.

Roger R. E. e Arnold J. F. (1996) - *Reliably estimating the noise in AVIRIS hyperspectral images*. Int. J. Remote Sensing, 17: 1951-1962.

Smith G. M. e Curran P. J. (1996) - *The signal-to-noise ratio (SNR) required for the estimation of foliar biochemical concentrations*. Int. J. Remote Sensing, 17: 1031-1058.

Vane G. e Goetz A.F.H. (1988) - *Terrestrial Imaging Spectroscopy*. Remote Sens. of Environment. 24:1-29.